

# ДЕТЕРМИНИРОВАНО-СТОХАСТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЙ СТОКА И БИОГЕННОЙ НАГРУЗКИ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ КЛИМАТА

*Кондратьев С.А., Шмакова М.В.*

ФГБУН Институт озераведения РАН

[kondratyev@limno.org.ru](mailto:kondratyev@limno.org.ru), [m-shmakova@yandex.ru](mailto:m-shmakova@yandex.ru)

При решении задач, связанных с моделированием стока и биогенной нагрузки на водные объекты, одной из основных проблем, ограничивающих возможности калибровки и верификации модели и снижающих достоверность расчётов, является недостаток данных натурных наблюдений. В то же время для решения широкого круга прикладных задач, связанных с возможными изменениями стока и биогенной нагрузки под действием климатических и антропогенных факторов, требуется оценка не только средних значений искомых величин, но и параметров функций их распределения. Средством решения такого рода задач могут служить детерминированно-стохастические (ДС) модели, включающие блок генерирования продолжительных рядов метеорологических элементов (стохастическую модель погоды – СМП) в качестве входа в последующие детерминированные блоки модели.

Кроме генератора рядов метеозаписей в виде стохастической модели погоды, построенная ДС-модель включает гидрологическую модель формирования стока с водосбора и модель биогенной нагрузки. В рамках ДС-моделирования решаются следующие задачи:

- оценка параметров СМП для наблюдаемых рядов метеорологических элементов (среднесуточная температура воздуха, суточные суммы осадков);
- имитационное моделирование рядов метеорологических элементов продолжительной длины;
- пересчёт суточных значений метеорологических элементов в среднемесячные значения;
- моделирование месячных и годовых сумм стока по гидрологической модели, прошедшей верификацию в изучаемом регионе;
- моделирование годовых значений нагрузки по модели биогенной нагрузки, прошедшей верификацию в изучаемом регионе;
- оценка параметров распределения годовых значений стока и биогенной нагрузки (среднего значения, среднего квадратического отклонения и значений различной обеспеченности превышения).

Итогом ДС-моделирования в данном случае является набор кривых распределения годовых значений стока и биогенной нагрузки для изучаемого объекта.

**Стохастическая модель погоды – СМП.** Для оценки возможных изменений параметров распределения гидрологических характеристик разработана и практически реализована стохастическая модель погоды [4]. Модель служит основой для ДС-моделирования характеристик стока, обеспечивая поток метеорологической информации на вход различных математических моделей формирования стока. При моделировании применяется гипотеза о функционально-нормальном законе распределения метеорологических величин, которая позволяет использовать хорошо разработанный для нормального закона распределения корреляционный аппарат. При разработке алгоритмов модели также использовалась гипотеза стационарности случайных процессов и однородности и изотропности случайных полей. Моделирование метеорологических элементов осуществляется для назначенных на водосборе расчётных точек или для метеорологических станций. В случае несовпадения расчётных точек с метеостанциями параметры СМП интерполируются по данным соседних метеостанций в расчётные точки.

**Модель формирования стока ИЛНМ.** Гидрологическая модель формирования стока с водосбора ИЛНМ (Institute of Limnology Hydrological Model) разработана в Институте озераведения РАН [2, 3] и предназначена для расчётов гидрографов талого и дождевого стока с водосбора, а также уровня воды в водоёме. Модель имеет концептуальную основу и описывает процессы снегонакопления и снеготаяния, испарения и увлажнения почв зоны аэрации, формирования стока, а также регулирования стока водоёмами в пределах однородного водосбора, характеристики которого принимаются постоянными для всей его площади. Модель может работать как с месячным шагом по времени, так и с годовым. В процессе моделирования водосбор представляется в виде однородной имитирующей ёмкости, накапливающей поступающую воду и затем постепенно её отдающей. Также предусмотрен расчёт глубины водоёма, принимающего сток с водосбора, в результате решения уравнения водного баланса в предположении равенства значений испарения с водной поверхности и испаряемости.

**Модель формирования биогенной нагрузки ИЛНМ** (Institute of Limnology Load Model) [2]. Модель предназначена для решения задач, связанных с количественной оценкой биогенной нагрузки, сформированной точечными и рассредоточенными источниками загрязнения, и прогнозом её

изменения под влиянием возможных антропогенных и климатических факторов. Модель учитывает вклад точечных и рассредоточенных источников в формирование биогенной нагрузки на водосбор, позволяет рассчитывать вынос примесей с водосбора с учётом влияния гидрологических факторов и удержания биогенных веществ водосбором и гидрографической сетью. Итогом моделирования является количественная оценка биогенной нагрузки на водоём со стороны водосбора и отдельных его составляющих.

**Оценка возможных изменений стока и биогенной нагрузки на Российскую часть Финского залива в условиях климатических изменений.** Построенная ДС-модель использована для решения задачи оценки возможного изменения стока и выноса фосфора с Российского водосбора Финского залива в результате реализации различных сценариев изменений климата. Вопросы, связанные с оценкой и прогнозом биогенной нагрузки на Балтику, приобрели в настоящее время особую актуальность в связи с попытками выполнения рекомендаций Плана действий по Балтийскому морю (ПДБМ) ХЕЛКОМ. В рассматриваемой задаче СМП использовалась в качестве стохастического генератора не только рядов метеозлементов в современных климатических условиях, но и учитывающих возможные будущие их изменения. По заданным значениям осадков и температуры воздуха, соответствующим реализации рассматриваемых климатических сценариев, генерировались ряды метеозлементов продолжительностью 100 лет, после чего расчёты выполнялись с привлечением моделей ILHM и ILLM в порядке, изложенном выше. При решении задач, связанных с оценкой воздействия климата на экологическое состояние Балтийского моря [1], использовались сценарии ЕСНАМ А2 и ЕСНАМ В1, которые прогнозируют рост средней годовой температуры за 100 лет в изучаемом регионе соответственно на 6.0 и 4.2, °С, а рост средних годовых осадков за 100 лет на 0.39 и 0.05 мм сут<sup>-1</sup>. Эти же значения использовались и в настоящей работе. Как показали результаты расчётов, реализация рассмотренных климатических сценариев может привести к существенному снижению стока с Российского водосбора Финского залива – на 47% для ЕСНАМ А2 и 35% для ЕСНАМ В1 по отношению к современному уровню. Снижение фосфорной нагрузки не столь значительно – на 22% для ЕСНАМ А2 и 16% для ЕСНАМ В1. Объяснением может служить тот факт, что не все источники нагрузки зависят от стока.

#### Список использованных источников

1. Карлин Л.Н. Прогностические оценки влияния изменения климата на экологическое состояние Балтийского моря. Отчёт по проекту РФФИ № 09-05-13553, 2010.
2. Кондратьев С.А. Формирование внешней нагрузки на водоемы: проблемы моделирования. – СПб.: Наука, 2007. 255 с.
3. Кондратьев С.А., Шмакова М.В. Изучение формирования стока с речных водосборов методами математического моделирования (на примере бассейна Ладожского озера) – Тр. XII съезда РГО, СПб., Наука, 2005, т.6, с. 99–104.
4. Шмакова М.В. Стохастическая Модель Погоды в системе детерминировано – стохастического моделирования характеристик стока: Автореф. дис. на соиск. уч. степ. к.т.н., Гос. гидрол. ин-т, СПб: 2000, 25 с.